



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY**  
**A BIOMECHANIKY**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS  
AND BIOMECHANICS

## **NÁVRH LABORATORNÍHO STENDU PRO TEPLITNÍ MĚŘENÍ**

DESIGN OF LABORATORY STAND FOR TEMPERATURE MEASUREMENT

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**JIŘÍ MATĚJŮ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV RAUDENSKÝ, Csc.

BRNO 2011



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2010/2011

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Jiří Matějů

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Návrh laboratorního stendu pro teplotní měření**

v anglickém jazyce:

#### **Design of laboratory stand for temperature measurement**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte technické řešení laboratorního stendu, který bude využívat pro dosažení zkušební rychlosti volný pád zkušební desky. Stend bude navržen pro testy chladicích účinků na svisle se pohybujících površích (aplikace například pro chladicí sekce pro tepelné zpracování vyválnovaných pásů). Požadovaná maximální rychlost na měřeném úseku v délce dva metry je 10 m/s.

Cíle bakalářské práce:

1. Provedte rozbor dynamiky děje s důrazem na rozběh a brzdění.
2. Vytvořte základní konstrukční návrh řešení.
3. Navrhněte metodu nebo možné metody regulace rychlosti.

Seznam odborné literatury:

1. Kemek, V.: Dopravní a zdvihací stroje, SNTL Praha, 1988
2. ČSN 27 0140-1 Jeřáby a zdvihadla
3. Skripta FSI nebo učebnice ze základních kurzů Fyziky, Mechaniky a Částí strojů

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 22.3.2011

L.S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

# Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem řešení laboratorního stendu pro teplotní měření. Jedná se o zařízení, které je schopné z výšky 7 m urychlit ocelový vzorek o hmotnosti do 20 kg na rychlost do 10 m/s. Během pracovního cyklu je vzorek na dráze 4 m urychlen, na dráze 2 m je udržována konstantní rychlost, poté je na dráze 1m zabrzděn a následně vytažen zpět do původní polohy. Během konstantní rychlosti je vzorek chlazen vodními tryskami a je měřen průběh teploty na vzorku. Rozjezd a udržování vzorku na konstantní rychlosti je zajištěno pomocí asynchronního servomotoru se servozesilovačem a brzdění pomocí mechanického brzdného systému. Práce obsahuje výběr konstrukčního řešení problému. Zjednodušený dynamický výpočet a výběr komponent pro realizaci zařízení.

## Klíčová slova

Lineární pojezd, zkušební zařízení, teplotní měření pro kontinuální lití, optimalizace chlazení oceli

# Abstract

This Bachelor's thesis solves design of a laboratory stand for temperature measurements. The stand is able to accelerate a steel sample of maximal weight 20 kg from the height of 7m to the speed of maximum 10 m/s. During a duty cycle of the stand the sample is accelerated on the length of 4 m, the constant speed is kept on the length of 2 m, on the length of 1 m the sample is stopped and then it's lifted to a position for accelerating. During the constant speed the sample is cooled by water nozzles and there is measured temperature curve in the sample. The acceleration and constant speed is regulated by asynchronous servo motor with servo-driver. The stopping of sample is done by external mechanical braking system. The thesis is focused on selection of design solution, basic dynamic calculation and selection of individual components of stand.

## Keywords

Linear travel, the temperature measurement for continuous casting , optimization of steel cooling

## Bibliografická citace

MATĚJŮ, J. *Návrh laboratorního stendu pro teplotní měření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 34 s. 13. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc..

## Prohlášení autora o původnosti práce

*Já, Jiří Matějů, prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu.*

V Brně dne 27.5.2011

---

## Poděkování

*Děkuji vedoucímu práce prof. Ing. Miroslavovi Raudenskému, Csc. a doc. Miroslavovi Škopánovi, Csc za odbornou konzultaci.*



<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>2. VOLBA ZÁKLADNÍHO PRINCIPU ŘEŠENÍ .....</b>	<b>13</b>
<b>3. PŘEDBĚŽNÝ ROZBOR KINEMATICKÝCH A DYNAMICKÝCH POMĚRŮ .....</b>	<b>14</b>
3.1. SILOVÝ PŘÍSTUP .....	15
3.2. ENERGETICKÝ PŘÍSTUP .....	16
<b>4. NÁVRH KONSTRUKCE – KONSTRUKČNÍ PROBLÉMY .....</b>	<b>17</b>
4.1. VODÍCÍ KOLEJNICE .....	17
4.2. ZPŮSOB URYCHLENÍ VZORKU .....	18
4.3. UDRŽOVÁNÍ VZORKU NA KONSTANTNÍ RYCHLOSTI .....	18
4.4. BRZDĚNÍ VZORKU .....	18
4.5. SYSTÉM KLADEK, PŘENOS KROUTICÍHO MOMENTU Z MOTORU NA LANO .....	21
4.6. VOZÍK A UCHYCENÍ VZORKU NA NĚM, ŘEŠENÍ NÁRAZOVÉ ČÁSTI VOZÍKU .....	22
4.7. SYSTÉM ŘÍZENÍ POHYBU VZORKU BĚHEM CYKLU CHLAZENÍ .....	22
4.8. VEDENÍ KABELŮ PRO TERMOČLÁNKY .....	23
<b>5. NÁVRH KONSTRUKCE – VÝPOČTY .....</b>	<b>25</b>
5.1. METODY ŘEŠENÍ .....	25
5.2. REALIZACE VÝPOČTU .....	25
5.3. PROVEDENÉ VÝPOČTY .....	25
<b>6. NÁVRH KONSTRUKCE – VÝBĚR KOMPONENT .....</b>	<b>31</b>
6.1. KOMPONENTY .....	31
6.2. VEDENÍ VZORKU .....	31
6.3. PRUŽINY .....	31
6.4. POJEZDOVÁ KOLEČKA .....	31
6.5. LANO .....	31
6.6. MOTOR + SERVOZESILOVAČ .....	31
<b>7. ZÁVĚR.....</b>	<b>33</b>
<b>8. ZDROJE INFORMACÍ, ODKAZY A SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>34</b>



## 1. Úvod

Cílem práce je navrhnout konstrukční řešení laboratorního stendu pro teplotní měření. Jedná se o zařízení s pohybem měřeného vzorku ve svislém směru. Vzorek o hmotnosti 3 – 20kg (ocelová deska, plech) se nejprve zahřeje na předem určenou teplotu, urychlí se na rychlost až 10 m/s, bude chlazen vodními nebo vodo-vzdušnými tryskami a nakonec zbrzděn na nulovou rychlost. Měření teploty bude zajištěno pomocí termočlánků umístěných v měřeném vzorku.

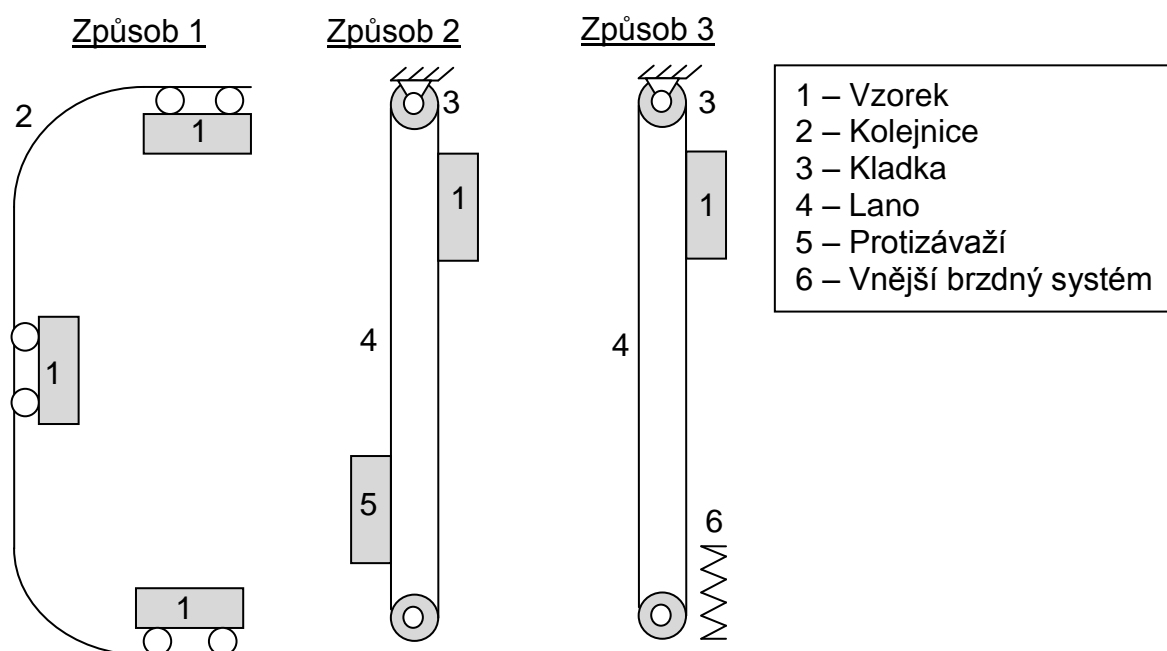
Hlavními problémy, které bylo nutné během práce vyřešit, jsou urychlení vzorku na požadovanou rychlost, udržování vzorku na konstantní rychlosti, zabrzdění vzorku, způsob lineárního vedení vzorku a řízení pohybu vzorku. Hlavní částí návrhu laboratorního stendu je stavební výtah GEDA 250 Comfort, který umožňuje lineární vedení vzorku. Součástí stavebního výtahu jsou kladky a lana pro vytahování nákladu. Vzorek je pomocí lana a systému kladek spojen s asynchronním servomotorem se servozesilovačem, pomocí kterého je možno pohyb vzorku řídit. Pro urychlení je primárně využita gravitační síla působící na vzorek, sekundárně je možno urychlit vzorek pomocí servomotoru. Udržování konstantní rychlosti během chlazení je řízeno servomotorem. Vzhledem k velké energii, kterou má vzorek při rychlosti 10 m/s, je k brzdění nutno využít vnějšího brzdného systému. V tomto případě je využito jednoduché pružiny, která má dostatečnou tuhost pro zabrzdění vzorku. Pružina může být doplněna hydraulickým tlumičem, který částečně přemění naakumulovanou energii na teplo. Pro různé hmotnosti a rychlosti padajících vzorků je nutno použít různé pružiny s potřebnou tuhostí. Pro zadané parametry je minimální potřebná výška stendu 7m. Z toho pro urychlení jsou třeba 4m, pro měření při konstantní rychlosti 2m a 1m pro zabrzdění vzorku.

Během práce bylo nutné provést výpočet dynamických poměrů pro určení potřebného výkonu motoru, volbu únosnosti lana, průměrů kladek a tuhosti brzdící pružiny. Elementární výpočet je vytvořen parametricky pomocí programu Mathcad, což umožňuje optimalizaci vlastností soustavy a výpočet nastavení zařízení pro různé aplikace.



## 2. Volba základního principu řešení

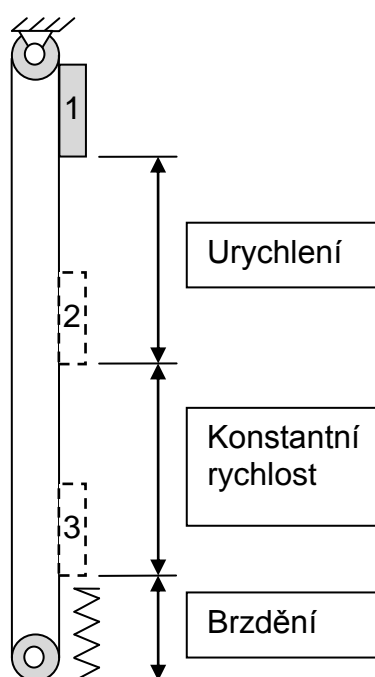
Vzhledem k požadavku na jednoduchost a nízkou cenu je výhodné, aby vzorek konal pouze lineární pohyb. Rotační pohyb by mohl být výhodný pro snížení výšky stendu Obr. 1 způsob 1. Nevýhodou však je složitost vodícího systému a velké zatížení způsobené odstředivou silou. Dále bude proto řešeno pouze lineární zařízení. Použití protizávaží by bylo vhodné v případě potřeby teplotního měření u vzorku s pohybem vzhůru Obr. 1 způsob 2. Nevýhodami tohoto řešení je dvojnásobná hmotnost, což způsobuje velké zatížení horní kladky a nutnost použít velmi silný elektromotor, který by vzorek urychlil a následně zbrzdil. Dále bude tedy řešen lineární stend bez použití protizávaží. Obr. 1 způsob 3.



Obr. 1 Volba principu řešení laboratorního stendu

## Předběžný rozbor kinematických a dynamických poměrů

- Maximální hmotnost závaží 20 kg
- Maximální rychlost 10 m/s
- Výška stendu 7 m
- Délka dráhy pro měření 2 m
- Cyklus pohybů vzorku: urychlení 1, konstantní rychlost 2, brzdění 3, vytažení vzorku do původní polohy Obr. 2

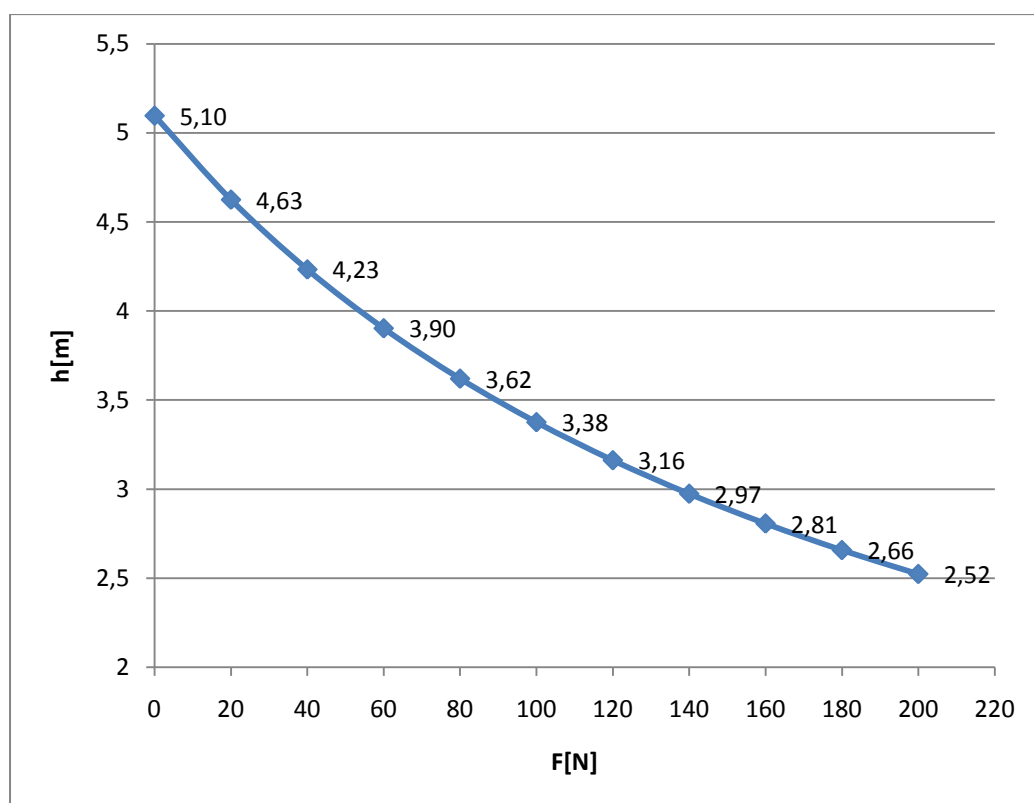


Obr. 2 Rozbor pohybů vzorku

## 2.1. Silový přístup

### Urychlení vzorku

Vzorek bude primárně urychlován gravitační silou. Pro dosažení rychlosti 10 m/s bude vhodné uvažovat o vnějším zdroji síly pro překonání pasivních odporů případně pro další urychlení. Potřebnou vnější sílu pro dosažení rychlosti 10m/s při dané výšce rozjezdu ukazuje graf na obrázku Obr. 3.



Obr. 3 Graf potřebné výšky v závislosti na dodané vnější síle v gravitačním poli pro rychlost 10m/s a hmotnost vzorku 20kg

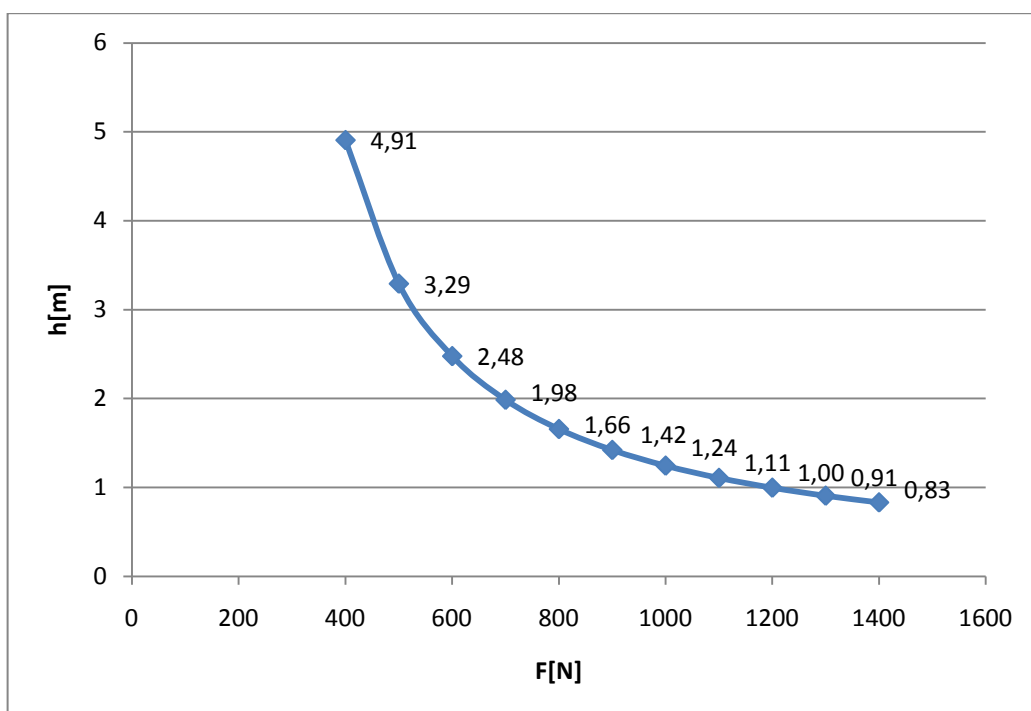
Z grafu je vidět, že pro dosažení rychlosti 10m/s pouze volným pádem budeme potřebovat výšku 5,1 m a to bez uvažování pasivních odporů. Pro snížení výšky rozjezdu na 3m by bylo nutné působit během celého rozjezdu konstantní silou 140N.

### Konstantní rychlost

Pro dosažení konstantní rychlosti bude nutné vyrušit vliv gravitační síly. Budeme tedy potřebovat při hmotnosti 20Kg sílu 196,2 N.

## Brzdění vzorku

Na Obr. 4 je graf závislosti brzdné dráhy  $h$  na použité síle  $F$



Obr. 4 Graf potřebné dráhy v závislosti na dodané vnější síle v gravitačním poli pro zabrzdění vzorku o hmotnosti 20kg z rychlosti 10m/s

Z Grafu je patrné, že síla potřebná na zabrzdění je nepoměrně větší, než síla potřebná pro rozjezd. Řešením může být navrhnout vnější brzdný systém. Pro zabrzdění vzorku na dráze 2m je nutná průměrná brzdná síla 800N. Pro zabrzdění na dráze 1m síla 1300N.

## 2.2. Energetický přístup

### Brzdění

Vzorek bude mít v počátku brzdění energii při brzdné dráze  $h = 1\text{m}$ :

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2} m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} \cdot 20 \cdot 10^2 + 20 \cdot 9,81 \cdot 1 = 1196 \text{ J}$$

Při brzdění na dráze  $h = 2\text{m}$ :

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2} m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} \cdot 20 \cdot 10^2 + 20 \cdot 9,81 \cdot 2 = 1392 \text{ J}$$

Tuto energii bude muset brzdný systém pohltit.



### 3. Návrh konstrukce – konstrukční problémy

- Vodící kolejnice
- Způsob urychlení vzorku na rychlost 10 m/s
- Způsob udržování vzorku na konstantní rychlosti – volba elektromotoru
- Způsob brzdění vzorku
- Systém kladek, přenos kroutícího momentu z motoru na lano
- Vozík a uchycení vzorku, řešení nárazové části vozíku
- Systém mechanického řízení
- Systém vedení kabelů pro termočlánky

#### 3.1. Vodící kolejnice

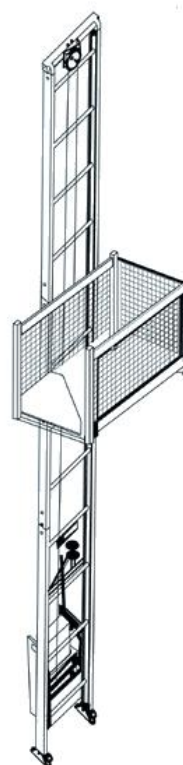
##### Požadavky na vodící kolejnice

- Rychlost pojezdu 10 m/s
- Odolnost proti povětrnostním vlivům
- Snadná údržba
- Odolnost proti bočnímu zatížení maximálně 20kg
- Rozebíratelnost.

##### Stavební výtah GEDA 250 Comfort

Požadavkům, které jsou na vodící kolejnice kladeny, nejlépe vyhovuje lineární vedení stavebního výtahu GEDA 250 Comfort [5]. Lehká hliníková konstrukce umožňuje jednoduchou manipulaci při rozebírání, odolává povětrnostním vlivům a disponuje dostatečnou nosností pro pohyb vzorku. Výhodou je také dostupnost náhradních dílů, není tedy nutné kupovat celý výtah, ale pouze potřebné součásti. Nevýhodou je určení výtahu pro nízkou rychlost 0,5 m/s. Z toho důvodu bude třeba upravit součásti výtahu jako kladky a ložiska vozíku tak, aby bylo možné dosáhnout rychlosti 10 m/s. Velkým problémem by mohla být vlastní frekvence, která může způsobit rozkmitání soustavy, vedení je proto nutné dostatečně tuze upevnit.

Technické údaje	
Nosnost	200 kg
Rychlost zdvihu	30 m/min
Max. výška	60 m
Napájení	230 V/16 A
Rozměr klece	124/83/110 cm (d/š/v)
Zastavěná plocha	1,8x1,5 m
Přeprava osob	NE



Obr. 5 Stavební výtah GEDA 250 Comfort

##### Stavební výtah SUPERLIFT MX 624/1024

Vhodným řešením se ukazuje použití sloupu ze stavebního výtahu SuperLift MX 624/1024 [10]. Sloup je robustnější a pevnější, než v předchozím případě, nehrozí proto takové riziko rozkmitání. Nevýhodou však je poměrně vysoká cena jednoho dílu sloupu.

## 3.2. Způsob urychlení vzorku

### Lineární elektromotor

Jednou z možností, jak urychlit vzorek na požadovanou rychlost 10 m/s, je použití lineárního motoru. Tato možnost je výhodná, protože lze opatřit velmi výkonné lineární motory a byl by vyřešen problém s vodícími kolejnicemi. Nevýhodami tohoto řešení však jsou nízká odolnost lineárního motoru proti nepříznivým podmínkám, ve kterých bude zařízení pracovat a vysoká cena.

### Rotační elektromotor a volný pád

Rotační elektromotor s kladkou by mohl být vhodný způsob urychlení. Ovšem ne příliš efektivní, protože vzorek bude urychlován volným pádem a motor bude muset mít velké úhlové zrychlení pro překonání zrychlení od volného pádu. Tento problém by bylo možné vyřešit tím, že motor bude roztáčet setrvačnick, který pomocí třecí spojky roztočí kladku a urychlí vzorek. Další možností je použití variátoru pro plynulou změnu otáček mezi motorem a hnací kladkou. Tato řešení jsou ale složitější, a jejich případné využití bude vhodné ověřit až po postavení prototypu.

### Volný pád

Tento způsob urychlení vzorku je nejjednodušší a pro dosažení rychlosti 10 m/s dostačující. Nevýhodou je minimální rozjezdová dráha 5,2 m, což se projeví na výšce stendu. Pasivní odpory a momenty setrvačnosti kladek je možné překonávat menším elektrickým motorem, sloužící k vytahování vzorku do původní polohy a udržování konstantní rychlosti vzorku. Vzhledem k jednoduchosti se tento způsob jeví pro výrobu prototypu nejvhodnější.

## 3.3. Udržování vzorku na konstantní rychlosti

### Odstředivá brzda

Pomocí odstředivé brzdy je teoreticky možné udržovat konstantní rychlost vzorku. Prakticky by mohl při zrychlení volným pádem nastat problém s rázy, které vzniknout skokovým spojením čelistí brzdy s brzdou plochou. Dalším problémem odstředivé brzdy je nutnost mechanického nastavování pro změnu rychlosti měření. Toto řešení se proto využívat nebude.

### Elektromotor s frekvenčním měničem

Pomocí elektromotoru s frekvenčním měničem a počítačovým řízením bychom mohli dosáhnout plynulého přechodu z volného pádu na konstantní rychlost. Tento motor je také možné využívat při vyzdvižení vzorku do původní polohy a může pomoci s urychlením vzorku. Toto řešení se proto jeví jako velmi výhodné. Nevýhodou ale je nutnost relativně velkého výkonu motoru, protože brzdění probíhá za vysoké rychlosti 10 m/s.

## 3.4. Brzdění vzorku

### Elektromotor

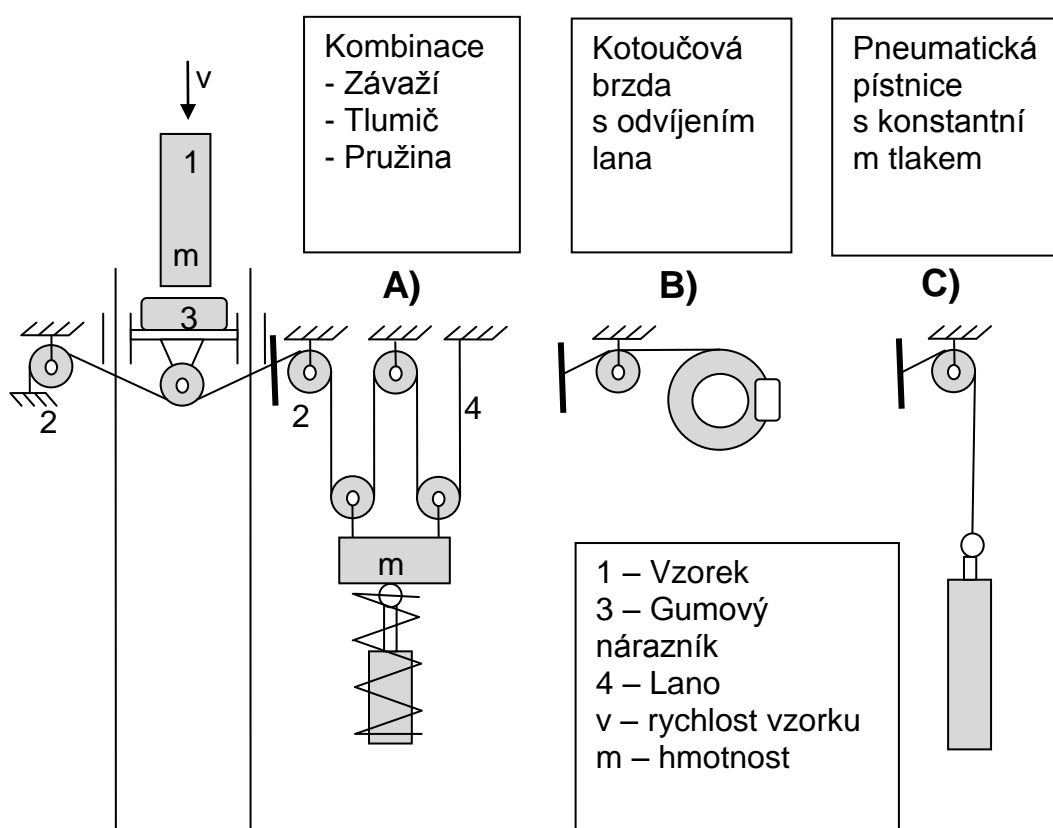
Pro lehké vzorky a menší rychlosti by bylo možné zabrzdit vzorek pouze pomocí elektromotoru použitého k vytahování a přibrzdování vzorku.

### Brzdění pomocí vinuté pružiny a gumového nárazníku

Tento systém brzdění je výhodný, jelikož má téměř lineární průběh brzdné síly. U tohoto systému však není možné měnit nastavení brzdné síly dle zátěže a rychlosti a nelze dosáhnout dostatečného rozsahu brzdné síly pro různé velikosti vzorků a dopadající rychlosti. Tento problém je možné řešit dovážením vzorku na požadovanou hmotnost, nebo použitím více pružin s různou tuhostí. Vzhledem k ceně pružiny je použití pružin s rozdílnou tuhostí pro různé aplikace vhodné řešení.

### Systém kladek a brzdny element

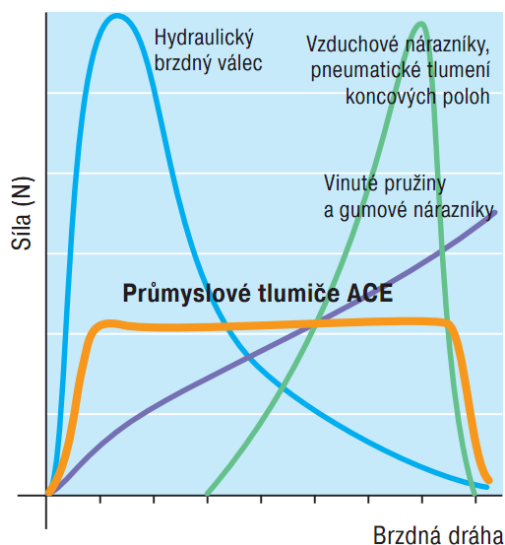
Brzdění je realizováno pomocí kladek a brzdnyho elementu Obr. 6. Například pružina, tlumič, píst, nebo kotoučová brzda. Případně závaží pohybující se v opačném směru než padající vzorek. Nebo kombinace těchto způsobů. Díky odsazení kladek 2 Obr. 6 do určité vzdálenosti od sebe dojde k plynulému náběhu brzdnyho účinku. Použitím brzdy, pístu s možností změny tlaku, nebo závaží lze regulovat brzdnu sílu v závislosti na rychlosti a váze padajícího vzorku. Tento systém však bude náročný na údržbu a realizaci.



Obr. 6 Způsoby brzdění vzorku

## Tlumič rázů

Další možností je použití tlumiče rázů [4]. Výhodou těchto tlumičů je konstantní brzdná síla během celého procesu brzdění. Na Obr. 7 je vidět porovnání jednotlivých způsobů brzdění. Vhodné jsou průmyslové tlumiče rázů ACE.



Obr. 7 Průběh brzdné síly v závislosti na brzdě dráze [4]

## Výpočet požadovaných tlumičů rázů pro různé hmotnosti a rychlosti

### 10 Těleso spouštěné konstantní rychlostí



#### Vzorce

$$W_1 = m \cdot v^2 \cdot 0,5$$

$$W_2 = m \cdot g \cdot s$$

$$W_3 = W_1 + W_2$$

$$W_4 = W_3 \cdot c$$

$$v_D = v$$

$$m_e = \frac{2 \cdot W_3}{v_D^2}$$

Obr. 8 Výpočet pro těleso spouštěné konstantní rychlostí

### Předběžný výpočet - vstupní parametry

- Dráha  $s = 0,1\text{m}$
- Počet cyklů  $c = 60/\text{h}$
- Gravitační zrychlení  $g = 9,81\text{ N/kg}$

### Minimální zatížení

- Hmotnost  $m = 3\text{kg}$
- Rychlost  $v = 2\text{ m/s}$
- Práce pístu  $W_3$   $W_3 = 0,5 \cdot m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot s = 8,94\text{Nm}$
- Ekvivalentní hmotnost  $m_e = \frac{2 \cdot W_3}{v^2} = 4,47\text{kg}$

### Maximální zatížení

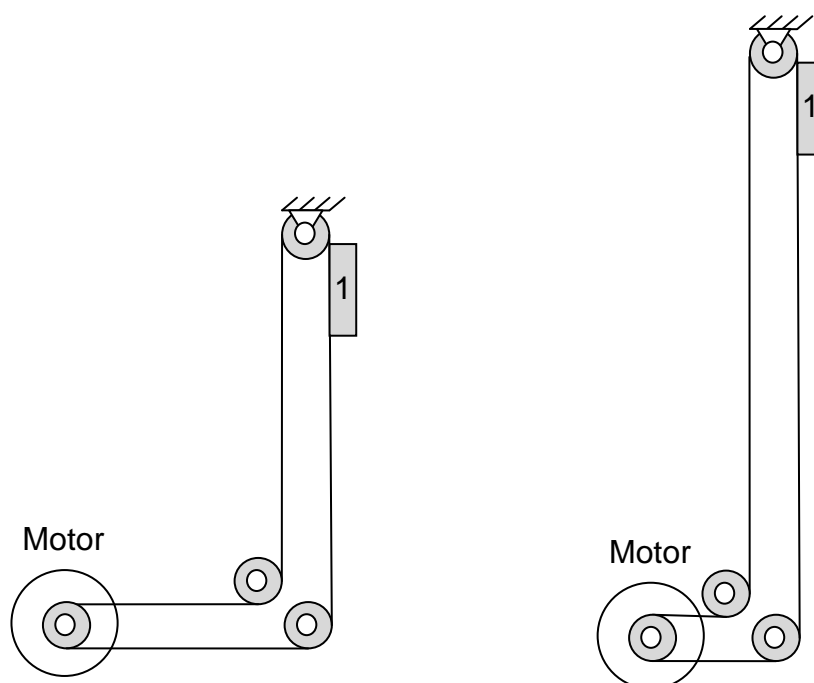
- Hmotnost  $m = 20\text{ kg}$
- Rychlost  $v = 10\text{ m/s}$
- Práce pístu  $W_3$   $W_3 = 0,5 \cdot m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot s = 1019\text{Nm}$
- Ekvivalentní hmotnost  $m_e = \frac{2 \cdot W_3}{v^2} = 20,39\text{ kg}$

Z výpočtu plyne, že rozsah ekvivalentních hmotností je od 4,47kg do 20,39 kg a rozsah práce vykonané pístem je od 8,94 Nm do 1019Nm. Tlumiče rázů však plní svoji funkci v malém rozsahu ekvivalentních hmotností a pro určitou hodnotu pohlcené energie. Z toho důvodu je tato varianta vhodná pouze pro speciální případy, například nadměrné hmotnosti a rychlosti, nebo je nutné vzorek pro pohlcení dané energie dovážet. Vzhledem k vysoké ceně těchto tlumičů v řádech 10 000Kč není vhodné použití různých tlumičů pro různé rychlosti a hmotnosti vzorků.

### 3.5. Systém kladek, přenos krouticího momentu z motoru na lano

#### Nekonečné lano s kladkami

Vzhledem k tomu, že motor bude využíván k částečnému urychlení i k udržování konstantní rychlosti, je vhodné použít nekonečné lano. Nevýhodou však je, že nebude možno měnit výšku stendu. Tento problém je možné řešit výměnou lan pro různé výšky, nebo napínáním lana mimo stend Obr. 9. Nekonečné lano lze nahradit lanem se dvěma konci upevněnými na vozíku.



Obr. 9 Napínání lana mimo stend pro možnost změny výšky

#### Naviják s kladkou v nejvyšším bodě stendu

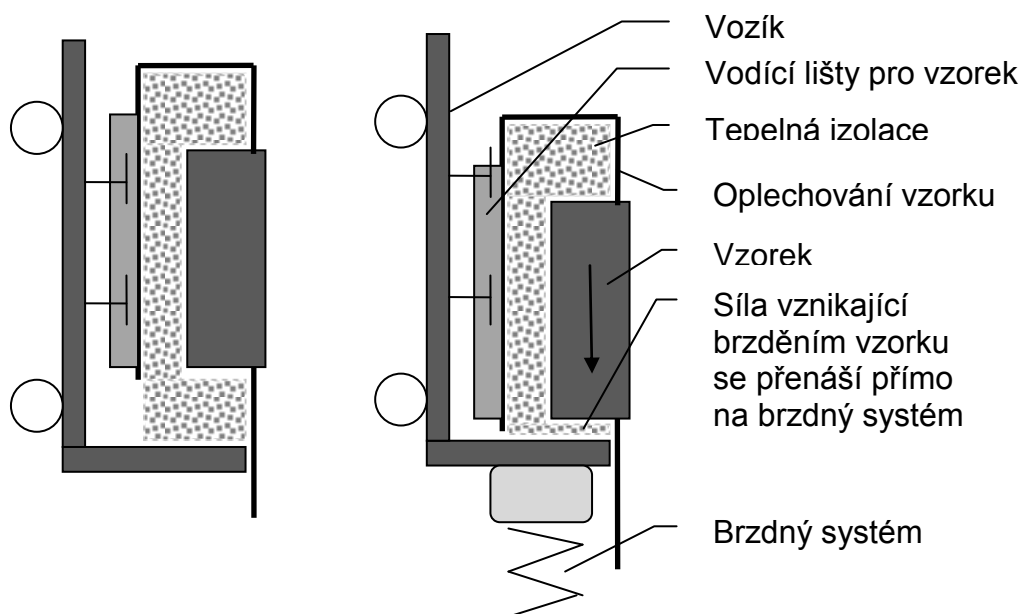
Naviják je vhodný v případě, že bude stavitelná výška stendu. Nebude však možné vzorek pomocí motoru urychlit, a pokud by rychlost odvíjení lana byla větší, než rychlost pádu vzorku, naviják by přestal plnit svoji funkci. Proto není toto řešení vhodné.

#### Přenos krouticího momentu

Přenos krouticího momentu na lano může být realizován pomocí kladky umístěné na pohonné jednotce.

### 3.6. Vozík a uchycení vzorku na něm, řešení nárazové části vozíku

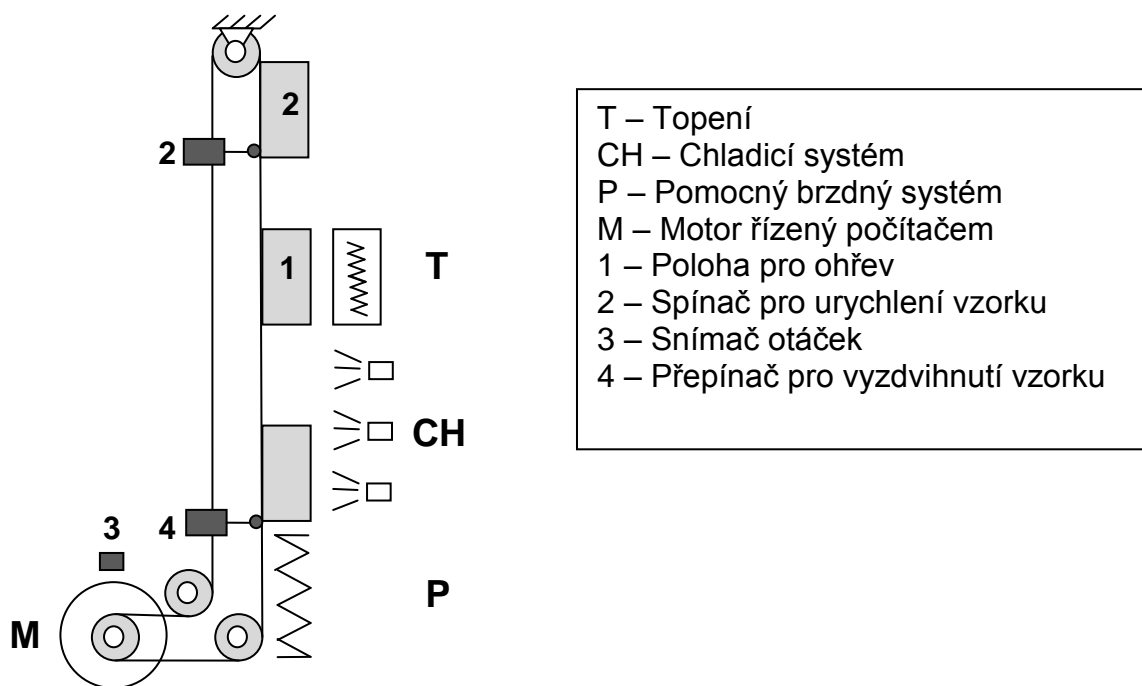
Vozík Obr. 10 je tvořen kolečky, které umožní pohyb v kolejnicích, rámem pro uchycení vzorku, nárazovou částí a vlastním vzorkem. Vzorek je připevněn na vodících lištách tak, aby setrvačná síla vzorku působila přímo na nárazovou část a nebyly tak zatíženy šrouby, kterými je vzorek uchycen k rámu.



Obr. 10 Vozík laboratorního stendu

### 3.7. Systém řízení pohybu vzorku během cyklu chlazení

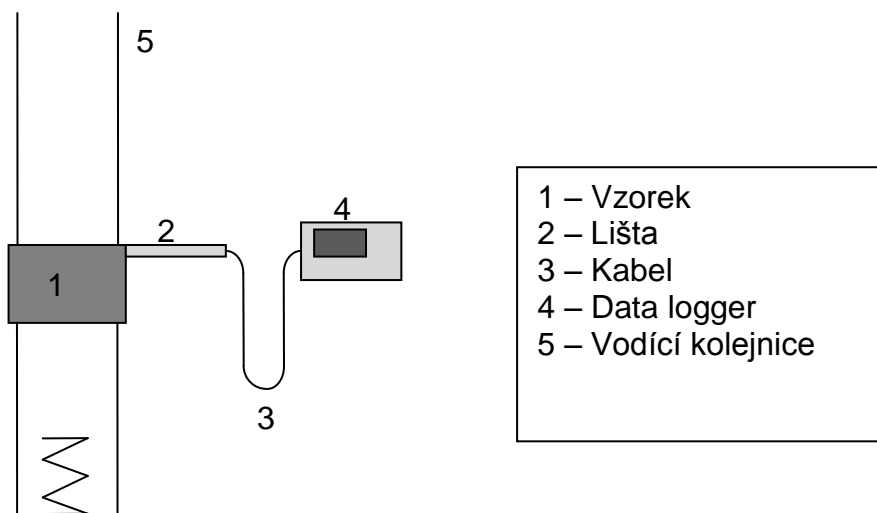
Pohyb vzorku bude řízen pomocí motoru s frekvenčním měničem. Vzorek bude na počátku v poloze 1 Obr. 11, kde bude pomocí topení ohříván na požadovanou teplotu. Po ohřátí bude vzorek vytažen do výchozí polohy pro urychlení 2. V tomto místě vozík stiskne spínač 2 a začne se urychlovat na požadovanou rychlost. Rychlost vzorku bude řízena pomocí počítače a snímače otáček 3, který po dosažení požadované rychlosti zabrzdí volný pád na konstantní rychlost. Jakmile vozík stiskne přepínač 4, motor se přepne do režimu pro vytahování vzorku zpět do polohy 2. Vzorek se mezi tím zabrzdí pomocí pomocného brzdícího systému P a vytáhne se do výchozí polohy, aby mohl být opět urychlen. Po ukončení měření se vzorek zastaví v poloze 4 a odtud bude pomocí ručního ovládání motoru vytažen do polohy 1 pro ohřev.



Obr. 11 Systém řízení pohybu vzorku

### 3.8. Vedení kabelů pro termočlánky

Jedním ze způsobů, jak přenášet data o naměřené teplotě z termočlánků do Data loggeru je pomocí volně visícího kabelu s 24mi vodiči Obr. 12. Tento způsob je výhodný, protože zařízení pro navíjení kabelu v rychlosti 10 m/s je velmi obtížně realizovatelné a Data logger není možné umístit přímo na měřený vzorek kvůli velkým rázům. Délka volně visícího kabelu pro 7m vysoký stand je minimálně 3,5 m. Kabel proto musí být pevný a ohebný. Kabel musí být vyveden pomocí lišty 2 do určité vzdálenosti od vzorku, aby nedošlo k vytržení proudem chladicí kapaliny.



Obr. 12 Způsob vedení měřících kabelů k Data Loggeru.





## 4. Návrh konstrukce – výpočty

Vzhledem k rozsahu práce jsou výpočty 0.0 pouze orientační pro vytvoření představy o dynamických poměrech, pro volbu lana, poloměru kladek, výkonu motoru a tuhost brzděné pružiny. Pružnost lana, pasivní odpory a kmitání a rázy v systému jsou zanedbány, veškeré prvky soustavy jsou uvažovány jako dokonalé tuhé a výpočet tedy neodpovídá skutečnosti. Výpočet také nezahrnuje havarijní stavy, do kterých se zařízení může dostat. Před realizací prototypu je nutné provést přesný výpočet a řídit se normou ČSN 27 0140.

### 4.1. Metody řešení

Výpočty dynamických poměrů jsou provedeny metodou redukce. Podstatou metody je na základě rovnosti kinetických energií vytvořit fiktivní soustavu, která koná čistě translační, nebo rotační pohyb. Dále stanovit fiktivní zatížení na základě práce, nebo výkonu. Metoda je vhodná pro zjednodušený výpočet, jelikož neuvažuje pasivní odpory a pro výpočet jednoho silového, nebo kinematického parametru.

Potřebné předpětí v laně je určeno z Eulerova vztahu pro výpočet minimální třecí síly při opásání hnacího kotouče lanem.

Maximální brzděná síla a tuhost pružiny je vypočtena na základě zákona zachování energie, ze kterého vyplývá, že se celá počáteční energie vzorku musí přeměnit na potenciální energii pružiny.

### 4.2. Realizace výpočtu

Výpočet je proveden v počítačovém programu Mathcad, což dovoluje optimalizaci parametrů zařízení při splnění požadovaných vlastností. Vstupní parametry zařízení byly nejprve určeny odhadem a následně optimalizovány na základě výsledků z předchozího výpočtu. Velmi důležitou výhodou je možnost jednoduše vypočítat důležité parametry jako tuhost pružiny, délka rozjezdu, brzděná dráha atd. pro různé rychlosti a hmotnosti vzorků.

### 4.3. Provedené výpočty

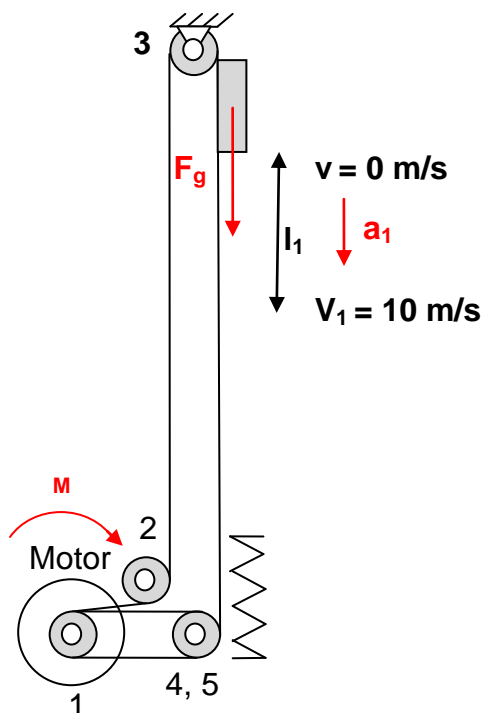
- Moment pro urychlení soustavy pro dosažení rychlosti  $v_0$  na délce  $l_1$
- Maximální brzděná síla pružiny a tuhost pružiny pro vzorek o hmotnosti  $m$
- Síla v laně při maximální brzděné síle
- Síla v laně při vytahování vzorku momentem  $M$  a teoretické zrychlení vozíku
- Moment potřebný pro udržení vzorku na konstantní rychlosti
- Předpětí v laně, aby nedošlo ke smyku lana na hnací kladce
- Maximální síla v laně a maximální zatížení horní kladky
- Únosnost lana a minimální poloměr kladky
- Určení minimálních vlastností pohonu – moment a výkon motoru

### Vstupní parametry

Výpočet je proveden pro nejnáročnější podmínky, při kterých bude stend používán. Výška stendu je vzhledem k výpočtu zvolena 7m, z toho 4m jsou pro rozjezd vzorku, 2m pro udržování konstantní rychlosti a 1m pro zabrzdění vzorku. Výkon motoru byl zvolen 4kW, který má dostatečný přebytek krouticího momentu i pro překonání pasivních odporů. Maximální rychlost, pro kterou bude stend využíván je 10 m/s. Parametry soustavy jsou uvedeny v příloze 0.0.

**Moment pro urychlení soustavy pro dosažení rychlosti  $v_0$  na délce  $l_1$** 

Vzhledem k tomu, že vozík se vzorkem je spojen lanem se soustavou kladek a s motorem, je minimální výška rozjezdu vyšší kvůli setrvačnosti této soustavy a pasivním odporům. Z toho důvodu je nutné vypočítat, jakým momentem musí motor působit na soustavu, aby byl na dané délce vzorek urychlen na potřebnou rychlost Obr. 13. Moment  $M$  je uvažován jako konstanta. Výpočet je uveden v příloze 0.0 v části V1.

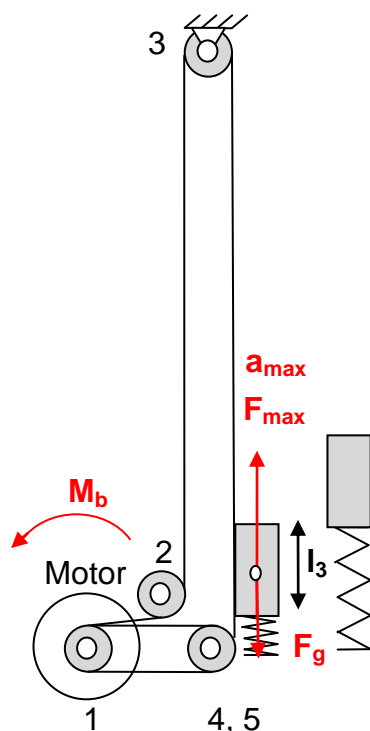


Obr. 13 Schéma pro výpočet dynamických poměrů při urychlení vzorku

Z výpočtu plyne, že minimální potřebný moment pro urychlení vzorku na 10 m/s na dráze 4m je 11 N/m. V případě využití maximálního výkonu motoru k urychlení je teoreticky možno dosáhnout dané rychlosti na délce 2, 25m. Přesto je vhodné zachovat výšku stendu, protože přechod mezi urychlením a konstantní rychlostí může být plynulejší.

### Maximální brzdná síla pružiny a tuhost pružiny pro vzorek o hmotnosti $m$

Pro orientační určení tuhosti pružiny bylo nutné vypočítat, jakou práci vykoná brzdná síla na dané dráze. Z vypočítané práce lze snadno dopočítat tuhost pružiny. V příloze 0.0 je uveden jako výpočet V2. Výpočet je proveden pro ideální pružinu, tedy s konstantní tuhostí, bez uvažování pasivních odporů a s dokonalou tuhostí soustavy.

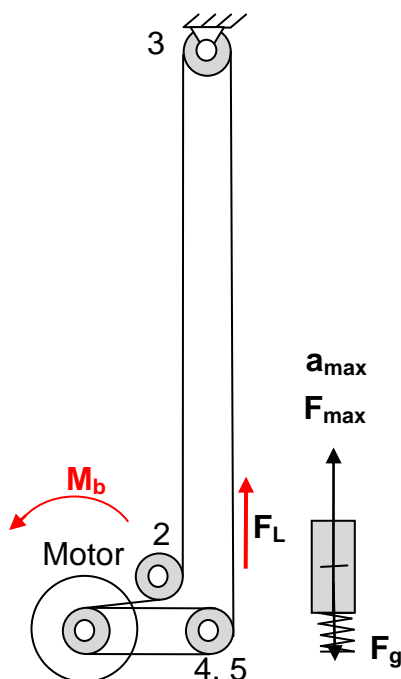


Obr. 14 Schéma pro výpočet dynamických poměrů při brzdění vzorku

Z výpočtu plyne, že při využití plného brzdného momentu motoru a při brzdění na dráze 1m je minimální nutná tuhost pružiny 2,52 kN/m. Síla při maximálním stlačení pružiny je 2,52kN. Tuhost pružiny by však měla být větší pro případ, že motor nebude schopný brzdit například z důvodu výpadku elektrického proudu.

### Síla v laně při maximální brzdě síle

Při brzdění vzorku dochází k namáhání lana, protože soustava má tendenci se setrvačností pohybovat stále stejnou rychlostí. Síla, která za daných podmínek vznikne, bude pouze 315N. Z výpočtu tedy plyne, že nedojde k překročení maximální povolené síly v laně. Viz příloha 0.0 výpočet V3.



Obr. 15 Schéma pro výpočet maximální síly v laně při brzdění vzorku

### Síla v laně při vytahování vzorku záběrným momentem $M$ a teoretické zrychlení vozíku

Protože motor musí pracovat při vysokých otáčkách, převodový poměr je 1 a moment motoru má malou hodnotu. Z toho důvodu je třeba zkontrolovat, zda bude mít dostatečný krouticí moment pro vyzdvižení vzorku zpět do horní polohy. Z výpočtu vyplývá maximální síla v laně v této fázi a teoretické zrychlení, kterého je pomocí tohoto momentu možno dosáhnout. Výpočet neuvažuje pasivní odpory, které také brání v pohybu vzorku. Výpočet se nachází v příloze 0.0 v části V5.

### Moment potřebný pro udržení vzorku na konstantní rychlosti

Vzhledem k tomu, že se jedná o konstantní rychlost, musí motor překonávat pouze gravitační sílu, kterou je vzorek urychlován. Motor však musí mít dostatečný přebytek krouticího momentu pro zbrzdění rychlosti v případě překmitnutí na vyšší rychlost. Pasivní odpory v tomto případě snižují potřebný krouticí moment. Výpočet je v příloze 0.0 označen jako V5.

Pro vzorek o hmotnosti 20kg vychází potřebný brzdový moment 24 Nm. Brzdový moment motoru je 34,2 Nm a z výpočtu plyne, že je schopný urychlovat vzorek teoretickým zrychlením až  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

### **Předpětí v laně, aby nedošlo ke smyku lana na hnací kladce**

Za pomoci odvozeného Eulerova vztahu [1] [3] určíme potřebné předpětí pro přenos nominálního krouticího momentu z motoru na lano. Předpokládá se, že u motoru bude omezen maximální krouticí moment právě na nominální. Výsledná síla předpětí je opravená koeficientem 1,5, protože stroj bude pracovat s nominálním momentem ve většině režimů a prokluz znamená ztrátu funkčnosti stendu. Pro výpočet je určen koeficient smykového tření v drážce vypočítaný pomocí úhlu drážky hnacího kotouče a koeficientu smykového tření na nosné ploše.

Vzhledem k velkému momentu, který musí hnací kotouč přenášet, je vhodné dvojité opásání, aby předpětí kleslo na nižší hodnotu. V příloze 0.0 nalezneme výpočet pod označením V6.

Výpočet udává, že síla předpětí 435 N dostatečně zajistí chod motoru bez prokluzu.

### **Maximální síla v laně a maximální zatížení horní kladky**

Maximální síla v laně je dána předpětím lana a maximálním momentem, který je motor schopen vyvinout, neuvažujeme-li rázy a havarijní stavy systému. Maximální zatížení horní kladky je rovno dvojnásobku maximální síly v laně. V příloze 0.0 je výpočet uveden jako V7.

Při využití maximálního momentu bude hodnota síly v laně 818N. To znamená, že horní kladka bude zatížena silou 1,64kN.

### **Únosnost lana a minimální poloměr kladky**

Únosnost je vypočítána na základě minimální síly potřebné k přetržení lana. Vzhledem k tomu, že zvolené lano o průměru 4 mm má koeficient bezpečnosti dostatečně velký, výpočet vzhledem k únavě není uveden. Výpočet má v příloze 0.0 označení V8.

Při použití ocelového nerezového lana o průměru 4 mm zvoleného v kapitole 6 „Návrh konstrukce – výběr komponent“ bude součinitel bezpečnosti 10, tedy dostatečný pro bezproblémový provoz. Hmotnost lana bude při délce 20 m 1,17 kg.

### **Určení minimálních vlastností pohonu – moment a výkon motoru**

Na základě vypočtených hodnot je možné určit minimální požadavky na asynchronní servomotor. Z vypočtených hodnot je možné zvolit vhodný výkon servomotoru. Servomotor by měl být dostatečně předimenzován, proto byl zvolen motor s výkonem 4kW. Výpočet minimálních požadavků nalezneme v příloze 0.0 jako V9. Minimální dosažitelné otáčky, aby bylo možné vzorek urychlit na rychlost 10 m/s jsou 954/min, minimální potřebný moment v celém rozsahu otáček je 24 Nm a minimální potřebný výkon 2,4 kW.

### **Shrnutí výsledků**

Na základě výpočtu je zvolena výška stendu 7m. Z toho 4 m slouží pro urychlení, 2 m pro měření na konstantní rychlosti a 1 m pro zabrzdění vzorku. Výkon servomotoru je zvolen 4 kW a otáčky 1000/min



## 5. Návrh konstrukce – výběr komponent

### 5.1. Komponenty

- Vedení
- Pružina pro brzdění + gumový nárazník
- Lano
- Pojezdová kolečka
- Kabel pro termočlánky
- Servomotor + měnič frekvence

### 5.2. Vedení vzorku

Vedení vzorku bude realizováno pomocí vedení ze stavebního výtahu GEDA 250 Comfort [5].

### 5.3. Pružiny

Pružiny mají plnit svoji funkci v rozsahu hmotností 3 – 20kg a v rozsahu rychlostí 1,5 – 10 m/s. Z toho plyne, že bude nutná možnost výměny pružiny dle potřebných parametrů, nebo dovážení vzorku takovým způsobem, aby pružiny plnili svoji funkci. Nevýhodou pružiny je odskakování vzorku. Proto bude pravděpodobně nutné doplnit pružinu hydraulickým tlumičem.

### 5.4. Pojezdová kolečka

Výhodou tohoto kolečka [6] je nízké tření díky použití kuličkového ložiska a relativně nízká hmotnost.



Obr. 16 Polyamidové pojezdové kolo pro velká zatížení

### 5.5. Lano

Pro dané prostředí je vhodné nerezové standardní lano 7x19 o průměru 4 mm, které disponuje minimální pevností 2,34kN [7].

### 5.6. Motor a servozesilovač

Motor EML – 40 A [8] má velmi vhodné parametry zejména proto, že není nutné používat převodovku díky příznivým nominálním otáčkám. Výhodou asynchronního servomotoru je přesné řízení rychlosti pohybu. Motor bude řízen pomocí servozesilovače ESTUN EDB-40A[JA] [9], který dokáže řídit rychlost a moment motoru. Servozesilovač je nutné opatřit modulem pro rekuperaci energie zpět do sítě nebo brzdícím odporem pro brzdění servomotorem. Pomocí servozesilovače nastavíme jako maximální krouticí moment nominální moment, aby nedošlo k přetížení soustavy. Pro případ přetížení soustavy z jiného důvodu bude vhodné spojit motor s hnacím kotoučem například pomocí třecí spojky.



Obr. 17 Asynchronní servomotor EML – 40A se servozesilovačem ESTUN EDB-40A[JA].

Výkon motoru	Napájení	Nominální moment	Špičkový moment
4kW	220V	38,2 Nm	114.6 Nm
Nominální otáčky	Max. otáčky	Jmenovitý proud	Špičkový proud
1000/min	1500/min	24A	72A
Provozní teplota	Moment setrvačnosti	Zpětná vazba	
0 – 40 °C	0,0102 kg/m <sup>2</sup>	Inkrementální 2500 pulzů	

Tab. 1 Parametry asynchronního servomotoru EML – 30A



## 6. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo zvolit vhodné konstrukční řešení laboratorního stendu pro teplotní měření. Laboratorní stend je určen pro zjišťování průběhu ochlazování ocelového vzorku při chlazení tryskami různých rozměrů a tvarů, pro snížení energetické náročnosti při kontinuálním lití oceli. Vzhledem k vysokým požadavkům na rychlost, kterou je nutno, aby se vzorek pohyboval je řešení relativně obtížné. Problémy byly zejména ve způsobu udržování konstantní rychlosti 10 m/s a ve způsobu zabrzdění vzorku.

Pro urychlení je využito gravitačního zrychlení a částečně výkonu servomotoru, který slouží také pro udržení konstantní rychlosti a vytahování vzorku zpět do polohy pro urychlení. Brzdění je realizováno pomocí ocelové pružiny s vhodnými parametry pro danou aplikaci. Výkon servomotoru musí být v porovnání s váhou vzorku relativně vysoký, protože musí mít dostatečný krouticí moment ve velkém rozsahu otáček od 0 do 1000/min.

Zvolení vhodného řešení bylo nutné udělat na základě dynamického výpočtu pro určení únosnosti lana, přibližné tuhosti pružiny, potřebného výkonu motoru, předpětí lana, aby nedocházelo k prokluzu a dalších vlastností zařízení. Výpočet je vytvořen v programu Mathcad, aby bylo možné rychle optimalizovat parametry stendu, tak aby vydržel požadované zatěžování a pro rychlé určení vhodných tuhostí pružin pro různé hmotnosti vzorků a rychlostí.

Zadání práce bylo zajímavé, bohužel ale také rozsáhlé, a proto nebylo možné řešit jednotlivé detaily do hloubky.

## 7. Zdroje informací, odkazy a seznam příloh

### Literatura

- [1] SHIGLEY, J.E.; MISCHKE, Ch. R.; BUDYNAS, R. G. *Konstruování strojních součástí*. Brno : VUTIUM, 2010. 1159 s.
- [2] SEJÁK J, *Rám výtahu*. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2008. 50 s. Bakalářská práce..
- [3] PROCHÁZKA, Zdeněk. *Návrh a realizace technologie součásti "trakční kotouč lanového výtahového stroje*. Brno: Vysoké učení technické, 2010. 60 s., 17. Diplomová práce. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.

### Odkazy

- [4] <http://ace-ace.com/downloads/cz/ACE-CAT-CZ.pdf>
- [5] <http://www.svp.cz/zebrikove-vytahy-geda-200-comfort.html>
- [6] [http://www.zabi.cz/files/File/KATALOG\\_ZABI\\_2011.pdf](http://www.zabi.cz/files/File/KATALOG_ZABI_2011.pdf)
- [7] <http://www.vazaky-online.cz/Nerezove-lano-7x19-6x19-WSC- g630002.html>
- [8] <http://raveo.cz/servomotory-estun-eml>
- [9] <http://raveo.cz/servozesilovac-PRONET>
- [10] <http://www.brka.cz/zdvihaci-technika/stavebni-vytahy-superlift/stavebni-vytahy-superlift-z320-330--nakladni.html>
- [11]

### Seznam příloh

- (1) Základní výpočet laboratorního stendu pro teplotní měření

Elektronické přílohy, CD obsahuje tyto soubory:

- (2) Elektronická verze bakalářské práce  
Matějů, J. Návrh laboratorního stendu pro teplotní měření.pdf
- (3) Elektronická verze základního výpočtu laboratorního stendu pro teplotní měření  
Matějů, J. Základní výpočet laboratorního stendu pro teplotní měření
- (4) Výpočet v programu Mathcad  
Matějů, J. Výpočet laborat